

전단 동축형 인젝터의 미립화 특성에 관한 연구

정원호* · 김동준 · 임지혁 · 윤영빈** (서울대학교 기계항공공학부)

Atomization Characteristics of Shear Coaxial Injectors

W. H. Jeong* · D. Kim · J. H. Im · Y. Yoon** (School of MAE, SNU)

ABSTRACT

The effects of injection conditions on the droplet sizes resulting from the disintegration of a liquid jet by a fast annular gas stream have been investigated using PDPA. The gas/liquid momentum ratio $M = \rho_g U_g^2 / \rho_l U_l^2$ and Weber number $We = \rho_g U_g^2 D_l / \sigma$ are selected as key parameters in atomization of shear coaxial spray from the fluid mechanics standpoint. It is revealed that $SMD(D_{32})$ varies inversely with gas/liquid momentum ratio (M), whereas Weber number (We) has little effect on the droplet sizes as gas velocities increase. It is found that gas/liquid momentum ratio is more dominant factor controlling the breakup and atomization process of shear coaxial spray. Finally, an empirical correlation between SMD and injection conditions (i.e. gas/liquid momentum ratio M and Weber number We) is proposed based on the experimental results.

초 록

전단 동축형 인젝터의 분사조건이 분무 액적의 크기에 미치는 영향을 조사하기 위하여 PDPA를 이용한 실험을 수행하였다. 분무 액적이 빠른 동축 기체에 의한 액체 제트의 분열로부터 생성되는 점을 고려하여, 기체와 액체 사이의 운동량 비(M)와 웨버 수(We)를 분사조건을 주요 변수로 선택하였고, 실험을 통하여 이들의 상대적인 영향력을 파악할 수 있었다. $SMD(D_{32})$ 가 운동량 비에 반비례한다는 사실이 관측된 반면, 동축 기체의 속도가 증가함에 따라 웨버 수에는 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타나, 운동량 비가 액체 제트의 분열 및 미립화 과정에서 웨버 수보다 중요한 역할을 담당 하리라 예상된다. 본 연구에서는 이러한 실험결과를 바탕으로 하여 분무 액적의 크기와 분사조건(운동량 비, 웨버 수) 사이의 관계를 나타내는 실험식을 제시하였다.

Key Words : Shear Coaxial Injector(전단 동축형 인젝터), SMD, Momentum Ratio(운동량 비), Weber Number(웨버 수)

* 서울대학교 대학원 기계항공공학부 (Graduate Student)

** 서울대학교 기계항공공학부 부교수 (Associate Professor)

1. 서 론

동축 기체에 의한 액체 제트의 분열 및 미립화는 스프레이를 이용하는 여러 분야에서 그 중요성이 인식되어, 지난 수십 년 간 많은 연구자들의 주목을 받아왔다. 특히, 분사조건과 인젝터 형상의 변화가 분무 액적의 크기에 미치는 영향을 이해하기 위하여 다양한 연구가 수행되었고, 그 결과로서 많은 수의 실험식이 제시되었다[1].

일반적으로 분무 액적의 크기 D_0 은 기체 속도의 지수 제곱에 반비례하는 것($D_0 \sim U_g^{-2}$)으로 알려져 있는데[2], 동축 기체에 의한 액체 제트의 분열이 분무 액적 생성의 주요 과정이라는 점을 감안할 때, 분무 액적의 크기를 기체와 액체 사이의 운동량 비로 표현하는 것이 좀더 타당하다고 판단된다[3][4]. 또한, 액체의 표면장력(σ)도 액체 제트의 분열 과정에 영향을 미치는 중요한 변수이므로 이에 대한 고려도 필요할 것이다.

따라서, 본 연구에서는 전단 동축형 인젝터의 미립화 특성을 나타내는 변수로서 기체와 액체 사이의 운동량 비($M = \rho_g U_g^2 / \rho_l U_l^2$)와 웨버 수($We = \rho_g U_g^2 D_l / \sigma$)를 선택하였다. 이 변수들이 분무 액적의 크기에 어떠한 영향을 주는지에 대하여 조사함으로써, 전단 동축형 인젝터의 분사조건과 관련된 실험식을 도출하고자 한다.

2. 본 론

2.1 실험장치 및 조건

본 연구에서 사용된 전단 동축형 인젝터는 일반적으로 쓰이고 있는 방식인, 내부 인젝터에서 산화제(액체), 외부 인젝터에서 연료(기체)가 분사되는 형태를 취하고 있으며, 필요에 따라 기하학적 형상을 쉽게 변화시킬 수 있도록 각 요소별로 분리하여 제작하였다(그림 1). 내부와 외부 인젝터의 내경은 각각 2.5mm와 7mm이고, 두 인젝터 간의 갭 크기는 1.5mm로 설정하였다. 또한, 추진제가 유입되는 홀의 직경 및 개수는 연료 인젝터의 경우 $\Phi 6 \times 5$ mm, 산화제 인젝터의 경우 $\Phi 1.3$ mm로 하여 각각 4개를 원주방향

으로 90°마다 배치하였다.

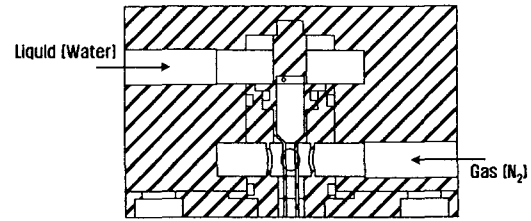


Fig. 1 Schematic of Shear Coaxial Injector.

실험에 사용된 변수는 기체와 액체 사이의 운동량 비(M)와 웨버 수(We)의 2가지로서 기체와 액체의 유량을 통하여 조절하였는데, 기체의 Non-choking 조건을 고려하여 $Q = 186.6 \sim 373.2$ l/min ($U_g = 120 \sim 240$ m/s)의 범위에서 기체(N_2)의 유량과, 이에 대응하는 액체(물)의 유량($\dot{m} = 14.7 \sim 29.45$ g/s, $U_l = 3 \sim 6$ m/s)을 선정하였다. 표 1에 위의 설계 및 분사 조건들을 정리하여 나타내었다.

Table 1. Design and Operating Conditions.

	산화제	연료
유사추진제	Water	N_2
위치	내부	외부
직경	2.5mm	7mm
유입구 직경 및 개수	$\Phi 1.3$ (4개)	$\Phi 6 \times 5$ (4개)
유량	14.7 ~ 29.45 g/s	186.6 ~ 373.2 l/min
속도	3 ~ 6 m/s	120 ~ 240 m/s

2.2 분무형상

전단 동축형 인젝터에서 분사된 액체 제트는 주로 상대속도가 빠른 동축 기체에 의하여 분열되므로, 이것의 특성을 설명하기 위해서는 적어도 2개의 독립변수가 필요하다. 일반적으로 많이 사용되고 있는 변수로서 레이놀즈 수($Re_l = U_l D_l / \nu_l$)와 웨버 수(We)가 있는데, 전단 동축형 인젝터의 실제 작동조건이 레이놀즈 수가 큰 영역($Re_l > 10^5$)임 감안할 때 액체 제트의 유동상

태에 대한 정보만을 가지는 레이놀즈 수(Re)는 다른 변수에 비하여 그 중요성이 작다고 할 수 있다[3][4]. 반면, 동축 기체에 의한 액체 제트의 분열이므로 기체와 액체 사이의 운동량 전달이 중요한 요소로 작용한다고 볼 때, 기체와 액체 사이의 운동량 비를 고려하는 것이 적합하다고 판단된다.

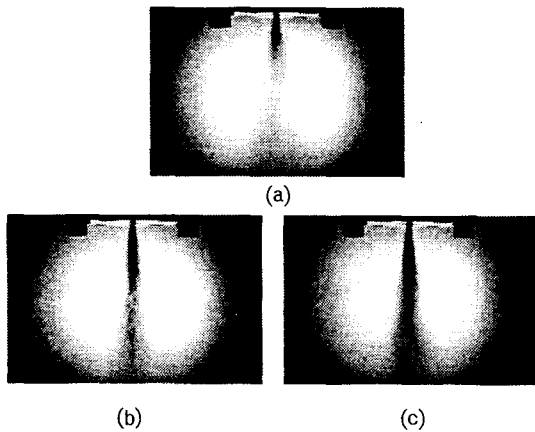


Fig. 2 Spray Shape of Shear Coaxial Injector. (a) (b) are the same Weber Number($We = 635$); (a) (c) are the same Momentum Ratio($M = 1.86$) Condition.

그림 2는 운동량 비와 웨버 수를 변화시켰을 때 나타나는 분무 형상을 보여주고 있다. 그림 2(a)를 기준으로 할 때 그림 2(b)는 같은 웨버 수 조건이면서 운동량 비가 낮은 경우, 그림 2(c)는 같은 운동량 비를 가지면서 웨버 수가 큰 경우에 해당한다. 일반적으로 액체 제트의 분열길이는 운동량 비에 반비례하는 것으로 알려져 있는데[5], 그림 2(a)와 2(b)에서 이러한 사실을 확인할 수 있다. 한편, 그림 2(c)의 경우 그림 2(a) 조건보다 액체의 유량이 커서 분열길이는 길게 나타났지만, PDPA 측정위치인 $z = 80\text{mm}$ 지점에서의 분무는 액체 제트의 1차 분열이 완료되어 그림 2(a)와 유사한 형태를 보이고 있다.

2.3 분사조건에 따른 분무 액적의 크기(D_{32}) 변화

PDPA는 레이저를 이용하여 분무 액적의 크기, 속도 등을 동시에 측정하는 비접촉식 측정

기법으로서, 공간분해능이 뛰어나고 측정 결과의 신뢰도가 높은 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 이러한 장점을 지니고 있는 PDPA를 사용하여, 인젝터의 분사조건(운동량 비와 웨버 수)이 분무 액적의 크기에 어떠한 영향을 미치는지에 대하여 조사하였다.

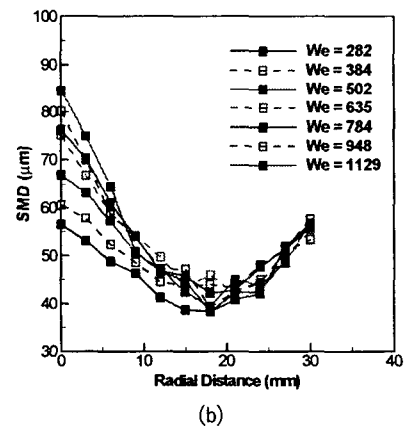
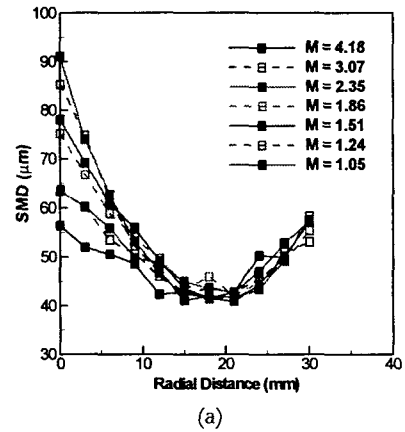


Fig. 3 SMD as a function of Radial Distance. (a) is the same Weber Number($We = 635$); (b) is the same Momentum Ratio($M = 1.86$) Condition.

그림 3은 운동량 비(M)와 웨버 수(We)를 변화시켰을 때 나타나는 분무 액적 크기(D_{32})의 공간분포를 보여주고 있는데, 모든 분사조건에서 앞선 연구자들의 결과와 경향성이 일치함을 확인할 수 있다[6][7]. 한편, 측정된 SMD 값은 특정 위치에서의 정보만을 나타내므로, 전반적인 분사조건에 영향을 조사하기 위해서는 식 (1)

과 같은 평균 SMD의 도입이 필요하다[8].

$$\overline{SMD} = \frac{\sum VF_j \cdot A_j \cdot SMD_j}{\sum VF_j \cdot A_j} \quad (1)$$

where VF_j : volume flux, A_j : ring shape area

식 (1)을 이용하여 각 분사조건에서 계산한 결과를 그림 4에 제시하였다.

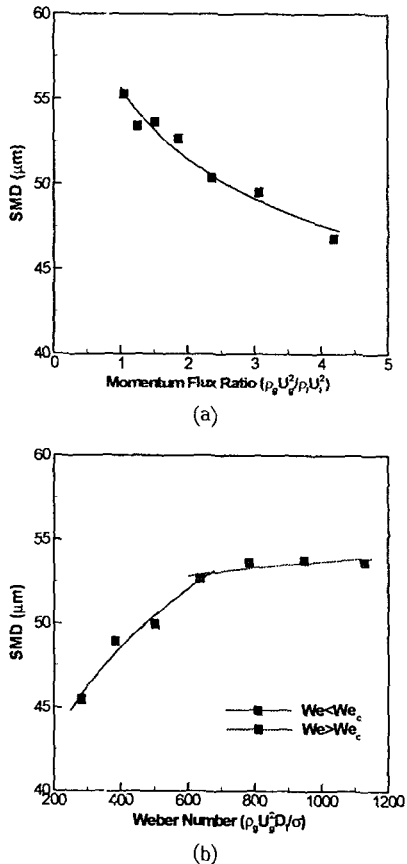


Fig. 4 Mean SMD as a function of Injection Conditions. (a) is the same Weber Number ($We = 635$); (b) is the same Momentum Ratio ($M = 1.86$) Condition.

그림 4(a)로부터 분무 액적의 크기가 운동량 비에 반비례함을 확인할 수 있고, 그림 4(b)에서는 웨버 수 조건에 따라 서로 다른 경향성을 가지는 두 개의 fitting을 볼 수 있는데, 동축 기체의 속도가 커짐에 따라 액체의 표면장력(σ)이 제트의 분열에 미치는 영향력이 상대적으로 감

소하여 나타난 현상으로 추측된다[5].

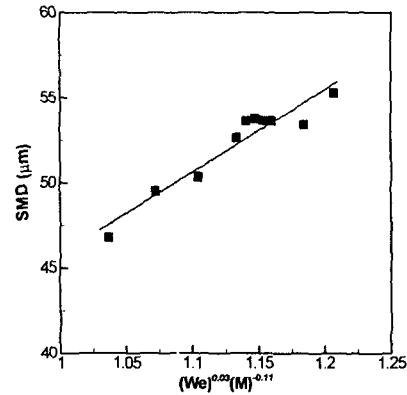


Fig. 5 Mean SMD as a function of Momentum Ratio and Weber Number.

$$\overline{SMD} = 48.3 We^{0.03} M^{-0.11} \quad (2)$$

그림 4의 실험 결과를 바탕으로 하여 운동량 비(M)와 웨버 수(We)를 포함하는 관계식을 그림 5와 식 (2)에 제시하였다. 평균 SMD 값은 운동량 비의 지수 제곱에 반비례하는 반면, 웨버 수에는 크게 영향을 받지 않음을 확인할 수 있다. 한편, 그림 5에 나타난 것처럼 자료의 전체적인 경향성은 일치하지만 자료의 수가 많지 않은 문제점이 있는데, 좀더 다양한 분사조건에서 보충 실험을 수행할 필요가 있다고 생각된다.

3. 결 론

전단 동축형 인젝터의 미립화 특성을 파악하기 위하여, 분사조건을 변화시켜 가면서 분무 액적의 크기를 측정하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 기체와 액체 사이의 운동량 비(M)와 웨버 수(We)는 전단 동축형 인젝터의 미립화 특성을 지배하는 중요한 변수로서, 분무 액적의 크기에 영향을 주며 운동량 비가 웨버 수에 비하여 좀더 우세한 역할을 담당하고 있다.
2. 운동량 비(M)는 액체 제트의 분열길이에도 영향을 미치는데, 분무사전을 통하여 이러한 사

실을 확인할 수 있다.

3. 기체 속도의 변화에 따라 액체 제트의 분열 과정에 관여하는 웨버 수(We)의 영향력이 달라 지는데, 이에 따라 평균 SMD 값도 영향을 받게 된다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실과제, “과제번호 : M1-0104-00-0058”과 소형위성 발사체 개발사업 위탁과제, “과제번호 : M1-02-DF-00-0001-02-D06-00-001-1-14”의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. Lefebvre, A., *Atomization and Sprays*, Hemisphere, New York, 1989.
2. Ingebo, R., “Experimental and Theoretical Effects of Nitrogen Gas Flow Rate on Liquid-Jet Atomization”, *J. Propulsion*, Vol. 4, No. 5, 1988, pp. 406~411.
3. Hopfinger, E. and J. Lasheras, “Breakup of a Water Jet in High Velocity Co-flowing Air”, *ICLASS-94 (Rouen, France)*, 1994, pp. 110~117.
4. Ferraro, M., “Effects of GH_2/LOX Velocity and Momentum Ratios on Shear Coaxial Injector Atomization”, *J. Propulsion*, Vol. 18, No. 1, 2002, pp. 209~211.
5. Lasheras, J. and E. Hopfinger, “Liquid Jet Instability and Atomization in a Coaxial Gas Stream”, *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2000, pp. 275~308.
6. Hardalupas, Y., “Characteristics of Sprays Produced by Coaxial Airblast Atomizers”, *J. Propulsion*, Vol. 10, No. 4, 1994, pp. 453~460.
7. Sankar, S., et al., “Liquid Atomization by Coaxial Rocket Injectors”, 29th Aerospace Sciences Meeting (Reno, NV), 1991.
8. Seol, J., et al., “Recess Effects on Spray Characteristics of Swirl Coaxial Injectors”, *KSAS International Journal*, Vol. 4, No. 1, 2003, pp. 26~33.